



УДК: 546.161, 615.916

DOI: 10.25514/CHS.2024.1.26006

Выбросы фтороводорода в атмосферу и его токсикологическое действие на природные объекты

*О. Б. Громов^{✉1}, М. Ю. Корниенко¹, С. О. Травин², М. Л. Ахтямова³,
П. И. Михеев³*

¹АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», Москва, Россия, e-mail: OIBGromov@bochvar.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия

³Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Поступила в редакцию: 27.03.2024 г.; после доработки 11.05.2024 г.; принята в печать: 14.05.2024 г.

Аннотация – В статье рассмотрены возможные источники выбросов фтороводорода в окружающую среду. Проанализированы механизмы токсического действия HF на живые организмы. Проведено рассмотрение нормативных документов по ограничению таких выбросов. Выявлена несогласованность нормативов по классу опасности фтороводорода, что приводит к нарушению условий труда персонала производств. Показано, что фтороводород является особо опасным токсикантом (универсальным ферментным ядом) в окружающей среде. Обосновано, что фтороводород следует относить к веществам первого класса опасности.

Ключевые слова: фтороводород, экология, токсические выбросы, класс опасности, предельно допустимая концентрация

Chemical hazard sources. Hazardous chemical substances

UDC: 546.161, 615.916

DOI: 10.25514/CHS.2024.1.26006

Emissions of hydrogen fluoride into the atmosphere and its toxicological effect on natural objects – a review

*Oleg B. Gromov^{✉1}, Mikhail Yu. Kornienko¹, Sergey O. Travin²,
Mariya L. Akhtyamova³, and Peter I. Mikheev³*

¹JSC “High-Technology Research Institute of Inorganic Materials named after Academician A.A. Bochvar”, Moscow, Russia, e-mail: OIBGromov@bochvar.ru

²N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow, Russia

Received: March 27, 2024; Revised: May 11, 2024; Accepted: May 14, 2024

Abstract – The article considers possible sources of hydrogen fluoride emissions into the environment. The mechanisms of toxic effect of HF on living organisms were analyzed. Regulatory documents to limit such emissions were reviewed. Inconsistency of norms on the class of hydrogen fluoride hazard has been revealed, which leads to violation of labour conditions of the production personnel. It has been shown that hydrogen fluoride is a particularly dangerous toxicant (universal enzyme poison) in the environment. It is justified that hydrogen fluoride should be classified as a substance of the first hazard class.

Keywords: hydrogen fluoride, ecology, toxic emissions, hazard class, Maximum Permissible Concentration.

ВВЕДЕНИЕ

Достаточно продолжительное время в природе существовало экологическое равновесие, т.е. деятельность человека практически не нарушала основных природных процессов. Динамичное развитие человеческого общества приводит к кардинальным изменениям в окружающей среде. До развития промышленной цивилизации начала XIX века загрязнения были сильно ограничены по количеству и распространению. Двадцатый век – век науки, индустриализации, роста энергетики, развития сельского хозяйства, улучшения социальной сферы и других направлений технического прогресса. При этом увеличивалось вредное воздействие на окружающую среду в следствии промышленной деятельности человека. В результате в XX веке происходило, как правило, непредсказуемое изменение экосистемы планеты Земля. Для современного человека стало привычно жить в обстановке токсикологической напряженности из-за все возрастающих эмиссий вредных веществ, профессиональными вредностями, а также обусловленной экологическими, гуманитарными и технологическими катастрофами, что подвигло человечество на принятие общемировых мер в области охраны окружающей среды, например, Монреальский и Киотский протоколы, мораторий на испытания ядерного оружия в атмосфере и др. В настоящее время, наряду с поступательным развитием промышленности, развивается ее экологическая направленность и, в первую очередь, это решение проблем очистки и утилизации отходов, в частности, газовых выбросов промышленных предприятий [1]. Роль экологических факторов промышленных предприятий, предопределяющих бесперебойность их деятельности, часто выходит на первый план вследствие насущной необходимости охраны окружающей среды и уменьшения воздействия выбросов на здоровье населения.

Очевидно, что разнообразие последствий хозяйственной деятельности человека для окружающей среды должны быть ограничены таким образом, чтобы природные и техногенные системы могли справляться с этими воздействиями [2].

Цель настоящей работы заключается в подтверждении определения

фтороводорода, как особо опасного токсиканта по отношению к природным объектам, включая человека, и обоснование необходимости утилизации и обезвреживания фтороводорода на всех возможных уровнях и стадиях промышленного производства.

Общая характеристика выбросов газа и задачи их снижения

Определяющее внимание должно уделяться проблеме исключения исходных причин возникновения выбросов в атмосферу, так как именно промышленность является основным источником газообразных вредных химических веществ (ВХВ) [1, 3]. К газообразным ВХВ относят кислотообразующие оксиды азота, серы, углерода, а также галогены – хлор, фтор и их производные, разнообразные органические соединения и другие. Современный уровень развития цивилизации предполагает все большее вовлечение в сферу научных интересов с последующим применением результатов в промышленных производствах ранее сравнительно мало используемых химических элементов и их соединений. К таковым относится фтор, значение которого увеличилось с середины 40-х гг. прошлого столетия, благодаря развитию атомной промышленности и достижений медицины, обосновывающей существенное влияние соединений фтора на физиологические потребности природных организмов, в том числе, и человека. Однако, наряду с полезными свойствами фтора возникли проблемы по нивелированию его вредного влияния на развитие фауны и флоры в концентрациях выше потребности [3].

Фактически все предприятия по производству алюминия, никеля, меди и др. металлов, минеральных удобрений, кварца, предприятия фторорганического синтеза, ядерного промышленного комплекса, а также территории их расположения относятся к зонам повышенного риска по массовым заболеваниям населения, иногда с генетическими последствиями [2, 4–8]. В качестве примера можно привести регион Братского промышленного комплекса, в котором сосредоточено производство алюминия на крупнейшем в мире Братском алюминиевом заводе, целлюлозно-бумажное производство (Братский ЦБК, к настоящему времени закрыт, но последствия его эксплуатации еще не устранены), Братская ГЭС, Братский лесопромышленный комплекс, завод ферросплавов и завод полимеров, а также близко расположенный Ангарский промышленный комплекс, включающий в себя Ангарскую нефтехимическую компанию, Ангарский электролизный химический комбинат, завод катализаторов и органического синтеза, цементно-горный комбинат, несколько мощных ТЭЦ и другие предприятия [3, 9].

Жесткие требования к радиационной и химической безопасности в соответствии с основными принципами экологической политики Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», а также законы и стандарты по охране окружающей среды, включая системы международных стандартов, обуславливают ограничение воздействия ВХВ и радиоактивных веществ (РВ) на природные системы [10]. Если раньше основная цель заключалась в реализации наиболее простых и эффективных решений по

возврату преимущественно урана, особенно обогащенного по изотопу ^{235}U , в производственный цикл, а вынужденные потери в виде отходов направляли на шламовые поля и захоронение, списывая их, как безвозвратные потери, то в современных условиях, прежде чем отправить отходы на захоронение, необходимо выполнить ряд технических мероприятий с целью максимальной утилизации ценных компонентов и обезвреживания отходов до допустимого уровня концентраций ВХВ. Кроме того, экономические факторы заставляют задумываться о наиболее рациональном решении данных вопросов.

Однако следует заметить, что на наш взгляд существующее законодательство существенно отстает от реального положения дел в области охраны окружающей среды, если не квалифицировать его не явным, но фактическим поощрением допустимости нарушений. В соответствии с ч. 2 ст. 8.21 [11] «Нарушение условий специального разрешения на выброс вредных веществ в атмосферный воздух влечет наложение административного штрафа на юридических лиц от восьмидесяти тысяч до ста тысяч рублей». Для некоторых заводов уплата такой суммы при превышении выброса гораздо более экономически выгодна, чем содержание работоспособности очистных сооружений. Не исключено, что такие штрафы заложены в расходы предприятия – выгоднее заплатить эти мизерные суммы при наличии чистой прибыли в десятки-сотни миллионов рублей, чем тратить несколько миллионов на очистные сооружения. Далее еще интереснее, в соответствии с ч. 3 ст. 8.21 [11] «Нарушение правил эксплуатации, неиспользование сооружений, оборудования или аппаратуры для очистки газов и контроля выбросов вредных веществ в атмосферный воздух, которые могут привести к его загрязнению, либо использование неисправных указанных сооружений, оборудования или аппаратуры влечет наложение административного штрафа на юридических лиц от десяти тысяч до двадцати тысяч рублей». И вот это уже смешно, если бы не было так грустно – точно по выражению В.И. Ленина: «Формально правильно, а по сути издевательство» над природой.

Сравнение токсикологического действия газов

Среди выбрасываемых в атмосферу кислых газов основная масса приходится на так называемые традиционные опасные эмиссии (ТОЭ) - оксиды серы, азота и углерода (рис. 1) [1, 12]. С конца XX века в атмосферном воздухе фиксируют летучие органические соединения (ЛОС) в довольно значительном количестве, в том числе галогенсодержащие. Однако, галогенидные газы, в частности, HF , несмотря на кажущуюся относительную незначительность объемов выбросов (рис. 1), по своему вредоносному воздействию на объекты растительного и животного мира на порядок и более превышают вредное воздействие традиционных опасных эмиссий [4–6, 8, 9, 13, 14] (табл. 1).

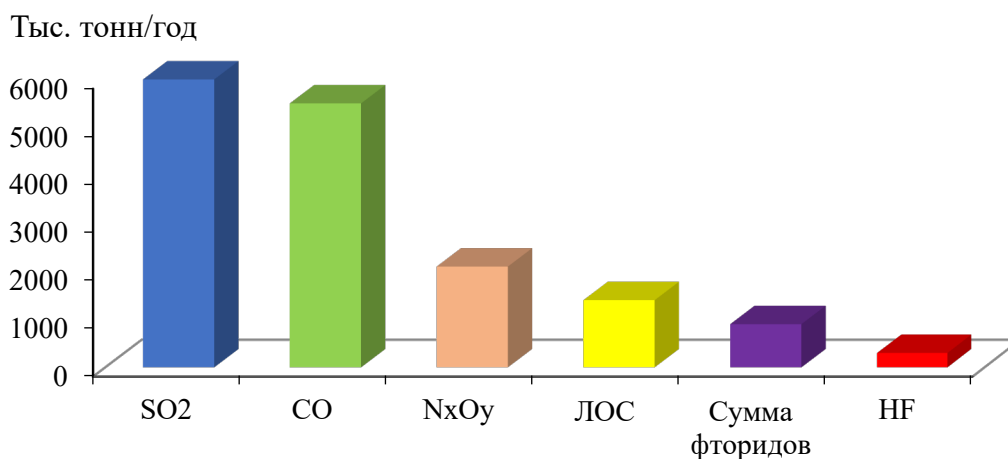


Рис. 1. Объемы выбросов различных газообразных ВХВ в атмосферу.

Fig. 1. Volumes of emissions of various gaseous harmful chemicals into the atmosphere

Таблица 1. Токсичность некоторых газов для хвойных деревьев [15]

Table 1. Toxicity of some gases to coniferous trees [15]

Токсикант	Содержание токсиканта в хвое, масс. %		Относительная токсичность, балл
	Пороговая	Критическая	
HF	0,005	0,02	1000
Cl ₂	0,13	0,33	3 – 300
SO ₂	0,10	0,40	1 – 100
NO ₂	-	-	0 – 30

На основании обобщенных данных, авторы предлагают критерий оценки токсичности различных газов и их смесей. В таблице 2 относительный коэффициент токсичности К рассчитан по формуле:

$$K = \alpha \tau' D / (100 - \alpha),$$

где $\tau' = 20/\tau$; $D = \sum [C_i / (\text{ПДК}_{\text{рз}})_i]$, C_i - концентрация токсиканта.

Газообразные соединения фтора при попадании в атмосферу активно взаимодействуют с природными объектами, нарушают природный баланс и обмен веществ в химико-биологическом составе объекта. По влиянию на природные организмы соединения фтора являются одними из самых токсичных соединений. В частности, если SO₂ оказывает воздействие на растения при концентрации 1 ppm (10⁻⁴ %), то влияние фтора начинается при содержании 0,001 ppm (10⁻⁷ %) [4, 15]. Фтор-ион является ферментным ядом многогранного действия, универсальным клеточным ядом, оказывая влияние на все клеточные структуры растительных и животных организмов, сильным дегидратирующим веществом, что и ведет к высокому повреждающему воздействию природных объектов [6, 7, 13, 14, 17–20].

Таблица 2. Относительная степень воздействия токсикантов на хвойные деревья**Table 2.** Relative degree of exposure to toxicants on coniferous trees

Состав токсиканта	ПДК _{рз} токсиканта [10], мг/м ³	Концентрация токсиканта С, мг/м ³	Период фумигации τ , сут	Степень некротизации α , %	Относительный коэффициент токсичности К
HF + Cl ₂ + ТОЭ	0,1; 1; 10; 5; 20	0,1 + 1 + 34	5	95	305
HF + N _x O _y	0,1; 5	0,1 + 2	20	99	140
HF + SO ₂	0,1; 10	0,1 + 1	20	99	110
HF	0,1	0,1	20	99	100
HF + CO	0,1; 20	0,1 + 30	20	95	30
Cl ₂ + ТОЭ	1 (Cl ₂)	1 + 33	20	90	27
SO ₂	10	1	20	40	1
N _x O _y	5	2	20	0	0
CO	20	30	20	0	0

Кроме вышеизложенного, необходимо сделать уточнение, что, хотя согласно ГОСТ 14022 фтороводород отнесен ко 2 классу опасных химических веществ по [10], исходя из того, что его предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны (ПДК_{рз}) определена равной 0,1 мг/м³, по прочим токсикологическим показателям, указанным в ГОСТ 12.1.007, такими, как средняя смертельная концентрация в воздухе (LC₅₀), коэффициент возможности ингаляционного отравления (КВИО), порог раздражающего действия, фтороводород несомненно относится к веществам 1 класса опасности (табл. 3), в том числе в соответствии с п. 1.3 ГОСТ 12.1.007.

Отнесение химического вещества к определенному классу опасности в большинстве нормативных документов основывается только по значению предельно допустимой концентрации в рабочей зоне. Для фтороводорода в [10] указана величина 0,5/0,1 мг/м³, на основании которой фтороводород отнесен ко 2 классу. Однако, величина 0,5 мг/м³ относится к максимально разовой концентрации в рабочей зоне (ПДК_{рз max}) в течении до 30 минут и не может являться критерием отнесения фтороводорода к тому или иному классу опасности. Кроме того, в соответствии с [10] легколетучие вещества (температура кипения не выше 20°C), имеющих ПДК_{рз} = 0,1 мг/м³, отнесены к 1 классу опасности, кроме фтороводорода, температура кипения которого равна 19,6°C, которую в нормативных документах округляют до 20°C и, исходя из этого не относят HF к легколетучим соединениям.

Таблица 3. Токсикологические характеристики фтороводорода**Table 3.** Toxicological characteristics of hydrogen fluoride

Показатель	Значение показателя				Класс опасности
	ГОСТ 12.1.007 1 класс опасности	ГОСТ 12.1.007 2 класс опасности	Для HF со ссылкой	Примечание	
ПДК рабочей зоны среднесуточная, мг/м ³ (ПДК _{рз} сс)	Менее 0,1	0,1 – 1,0	0,1 [10]	В течение 8 часов	2 по [10]
ПДК раб. зоны разовая, мг/м ³	-	-	0,5 [10]	В течение до 30 мин	-
Средняя смертельная концентрация в воздухе LC ₅₀ , мг/м ³	Менее 500	500 – 5000	445 [21–23] 315 [24]	-	1
КВНО	Более 300	300 – 30	860 1867 2058	Расчет по [12] Расчет по [25] Расчет по [26]	1
Порог раздражающего действия, мг/м ³	Менее 20 [24]	100 – 20	8 [27] 0,02 [10]	-	1

На наш взгляд разночтение показателя ПДК_{рз} можно было бы избежать, если бы значения данного показателя были оформлены в соответствии с ГОСТ 2.105 (табл. 4).

Таблица 4. Неточности оформления значений показателя ПДК_{рз}**Table 4.** Inaccuracies in the design of indicator values MPC_{wa}

Вещество	Оформление по [10]		Оформление по ГОСТ 2.105		Класс опасности
	Класс опасности		Класс опасности		
	1	2	1	2	
Фтороводород	0,5/0,1	0,1 – 1,0	0,1 вкл.	Св. 0,1 до 1,0 вкл.	1
			менее 0,1	0,1 – 1,0	2

Кроме того, в существующей научной, справочной и учебной литературе даже, например, для такого показателя, как ПДК_{рз}, приводятся значения от 0,05 мг/м³ до 0,5 мг/м³ с соответственным отнесением фтороводорода от чрезвычайно опасного вещества (1 класс опасности) до высоко опасного вещества (2 класс опасности). Например, согласно ГОСТ 12.1.005

фтороводород позиционирован как вещество 1 класса опасности, в [10] и ГОСТ 14022 – 2 класса опасности. А в соответствии с ГОСТ 32419-2013 у веществ 1 класса опасности показатель LC_{50} не более 100 ppm ($92,1 \text{ мг/м}^3$) – у фтороводорода 342 – 483 ppm ($315 – 445 \text{ мг/м}^3$) (табл. 3), что указывает на 1 класс опасности фтороводорода.

Источники фтороводорода и необходимость его обезвреживания

Фтороводород образуется в основном за счет явлений гидролиза фторидов, а также частичного терморазложения присутствующих в производственном цикле фторидных соединений, которые, в свою очередь, взаимодействуют с влагой, практически всегда присутствующей в виде примеси в веществах различных технологических процессов. Необходимо отметить, что многие фторидные соли могут образовывать с фтороводородом комплексные соединения типа гидрофторидов с незначительной температурой разложения. Например, фтороводород соединяется с различными соединениями за счет образования так называемой водородной связи, энергия разрушения которой небольшая.

Источниками фтороводорода на предприятиях конверсионного и разделительного комплекса атомной отрасли являются:

- производство элементного фтора: HF является основной примесью, содержание которой достигает иногда десятков процентов;
- восстановление UF_6 до U_3O_8 или UF_4 : основным побочным продуктом является HF;
- разложение плавикового шпата олеумом;
- производство ремонтных работ на разделительном, вспомогательном и химическом оборудовании: происходит выделение в рабочую зону HF, образующегося в результате гидролиза фторидных отложений;
- производство трифторида хлора: содержание HF в готовом продукте достигает 40% об.; эти продукты перед целевым применением необходимо очищать от HF различными методами, что в свою очередь вызывает осуществление технических мероприятий по предотвращению попадания фтороводорода в атмосферу [28].

С проблемой очистки выбросов в атмосферу от фтороводорода и пыли фторидов столкнулась промышленность при электролизном производстве алюминия, а также при переработке апатитовых руд в производстве фосфорных удобрений [3, 9].

Необходимо отметить, что на предприятиях, производящих или использующих фтороводород, зонировать помещения вторым классом опасности на основании ГОСТ 14022 [21–23], который выпущен с нарушением законодательства.

В настоящее время основной задачей газоочистки служит доведение содержания токсичных примесей в газовых смесях до предельно допустимых концентраций (ПДК), установленных санитарными нормами. В таблице 5 для сравнения приведены величины ПДК некоторых фтор- и хлорсодержащих

соединений, которые присутствуют в технологических газовых смесях и в газовых выбросах производств атомной промышленности [10, 29].

Таблица 5. Предельно допустимые концентрации летучих примесей

Table 5. Maximum permissible concentrations of volatile impurities

Вещество	ПДК _{нас сс} ,* мг/м ³	ПДК _{нас тах} ,** мг/м ³	ПДК _{рз сс} , мг/м ³	ПДК _{рз тах} , мг/м ³
HF	0,005	0,05	0,1	0,5
Cl ₂	0,03	0,1	1,0	5,0
HCl	0,2	0,2	0,5	5,0
UF ₆	***	-	0,015	0,02
PF ₅	-	-	0,1 [18]	-
JF ₇	-	-	2,2 [19]	-

*Предельно-допустимые среднесуточные концентрации для населенных пунктов.

**Предельно допустимые максимально разовые концентрации для населенных пунктов.

***Нет данных.

В таблице 6 приведены принятые в некоторых странах предельно допустимые концентрации фтороводорода и общего фтора, включая твердые фториды в воздухе [24, 30].

Таблица 6. ПДК фтороводорода и общего фтора в различных странах

Table 6. Maximum permissible concentrations of hydrogen fluoride and total fluorine in various countries

Страна	Рабочая зона		ПДК _{нас сс} , мкг HF/м ³	ПДК _{нас сс} , мкг F _{тв} /м ³
	HF, мг/м ³	Общий фтор, мг/м ³		
Великобритания	-	2,2	1 (общий)	1 (общий)
Германия	2	-	-	-
Канада	-	-	2,6	-
Нидерланды	2	-	10	-
Норвегия	2	2,5	-	-
Россия	0,5/0,1	1,0	5	20
США	2	2,5	3 – 7	-
Словакия	-	-	10	-
Чехия	-	-	10	-
Франция	-	0,7 – 5,1	-	-

Из таблицы 6 видно, что в России нормы по фтороводороду в воздухе, как в рабочей зоне, так и в населенных пунктах одни из наиболее жестких.

При невозможности достигнуть ПДК очисткой часто применяют многократное разбавление токсичных веществ и/или выброс газов через высокие дымовые трубы для рассеивания примесей в атмосфере. Однако, метод достижения ПДК с помощью «высоких труб» лишь паллиатив, так как не предохраняет атмосферу, а только переносит загрязнения из одного района в другие.

Вследствие того, что фтороводород, как показано выше, является чрезвычайно опасным веществом 1 класса опасности, обезвреживание или извлечение из производственных газов фтороводорода на максимально ранней стадии технологического процесса приобретает часто решающее значение при оценке вредного действия того или иного производства на окружающую среду, в том числе в рабочей зоне. Таким образом, разработка эффективных методов очистки и обезвреживания газов, содержащих HF и другие летучие фториды, является актуальной и востребованной задачей по превращению вредных производств в экологически чистые, а также по утилизации ценных компонентов.

Все способы очистки газов определяются в первую очередь физико-химическими свойствами примесей, их агрегатным состоянием, дисперсностью, химическим составом и др. Разнообразие вредных примесей в промышленных газовых выбросах приводит к большому разнообразию методов очистки, применяемых аппаратов и химических реагентов. Все методы очистки газовых выбросов подразделяются на жидкостные, в том числе использующие органические жидкости, которые, в свою очередь, также могут стать источниками загрязнения природы, и «сухие», т.е. не использующие воду и растворенные в ней различные соединения.

ВЫВОДЫ

1. Показано сильное токсикологическое действие фтороводорода на природные объекты и подтверждено литературными данными, что фтор-ион (фтороводород) является универсальным ферментным ядом, оказывающим сильное повреждающее воздействие на все клеточные структуры растительных и животных организмов.
2. Показано, что фтороводород является особо опасным токсикантом в окружающей среде.
3. Обосновано, что фтороводород является веществом 1 класса опасности.
4. Показано, что нормативные документы содержат разноречивые показатели по классу опасности фтороводорода, что приводит к недооценке его вредного воздействия на обслуживающий персонал.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS:

The authors declare no conflict of interests.

Список литературы

1. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, 2022. https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okrzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2021_/. (дата обращения 10.03.2024).
2. Фрумин Г.Т. (2015). Токсичность химических веществ для человека. *Ученые записки*

РГТМУ, (41), 188–198.

3. Горностаева Е.А., Фукс С.Л. (2017). Влияние фторсодержащих соединений на живые организмы. *Теоретическая и прикладная экология*, (1), 14–24. EDN: [ZHCBVDV](#).
4. Громов О.Б., Прокудин В.К. (2008). Экологическая опасность газовых выбросов заводов по производству алюминия. *Экология и промышленность России*, (10), 16–19.
5. Линге И.И., Новиков С.М., Шашина Т.А. и др. (2007). Анализ рисков для здоровья населения от воздействия экологических факторов различной природы в районе расположения Сибирского химического комбината. *Гигиена и санитария*, (5), 49–51.
6. Оноприенко М.Г. (2004). Фтор в окружающей среде: грани опасности. *Экология и промышленность России*, (5), 23–27.
7. Салтыкова М.М., Балакаева А.В., Федичкина Т.П. и Бобровницкий И.П. (2020). Основные причины смертности, обусловленной загрязнением воздуха. *Гигиена и санитария*, 99(4), 337–343. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-4-337-343>.
8. Вековшинина С.А., Клейн С.В., Жданова-Заплесвичко И.Г. и Четверкина К.В. (2018). Качество среды обитания и риск здоровью населения, проживающего под воздействием выбросов предприятий цветной металлургии и деревообрабатывающей промышленности. *Гигиена и санитария*, 97(1), 16–20. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2018-97-1-16-20>.
9. Зайцева Н.В., Май И.В. (2021). Основные итоги, перспективы применения и совершенствования оценки риска здоровью населения сибирских городов – участников проекта «Чистый воздух» (Братск, Норильск, Красноярск, Чита) *Гигиена и санитария*, 100(5), 519–527. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-5-519-527>.
10. СанПиН 2.1.3684-21.
11. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях от 30.12.2001 № 195-ФЗ (ред. от 12.12.2023).
12. Смирнова В.М., Борисов А.В., Борисова Г.Н. и Ивашкин Е.Г. (2019). *Токсикология: промышленные и экологические аспекты*. Учеб. пособие. Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева.
13. Жукова А.Г., Горохова Л.Г., Киселева А.В. Сазонтова Т.Г., Михайлова Н.Н. (2018). Экспериментальное исследование действия низких концентраций фтора на уровень белков семейства HSP в тканях. *Гигиена и санитария*, 97(7), 604–608. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2018-97-7-604-608>.
14. Калюжная Е.Э., Просеков А.Ю. и Волобаев В.П. (2020). Генотоксические свойства фторид-иона. *Гигиена и санитария*, 99(3), 253–258.
15. Рожков А.С., Михайлова Т.А. (1989). *Действие фторсодержащих эмиссий на хвойные деревья*. Новосибирск: Наука.
16. Мирзакаримова М.А. (2017). Сравнительная гигиеническая оценка комбинированного действия сложных смесей химических загрязнений атмосферного воздуха. *Гигиена и санитария*, 96(6), 528–531. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2017-96-6-528-531>.
17. Громов Б.В. (1978). *Введение в химическую технологию урана*. – М.: Атомиздат.
18. Низкодубова С.В. (1999). *Разработка ОБУВ (ПДК) для пентафторида фосфора в условиях рабочей зоны*. В сб. докладов 5-й НТК СХК. Секция 3. Северск: НИКИ СХК, С. 328.
19. Шевцова Н.М., Низкодубова С.В., Козлов Ю.А. и др. (1999). *Гептафторид йода и его влияние на периферическую кровь в эксперименте*. В сб. докладов 5-й НТК СХК. Секция 3. Северск: НИКИ СХК. С. 334.
20. Бабенко С.П., Бадьин А.В. (2021). О расчетном методе оценки воздействия на человека продуктов гидролиза гексафторида урана. *Гигиена и санитария*, 100(1), 13–18. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-1-13-18>.
21. Паспорт безопасности АО «ПО ЭХЗ» РПБ № 07623106.20.77128
22. Паспорт безопасности вещества HF-RUS-60 «Фтороводород». ООО «BKGroup», 13.02.2021.
23. Паспорт безопасности вещества «Фтороводород». ООО SIAD Rus. Индекс ПБВ:

00070_LIQ. ПБМ Реф: 00070_LIQ.

24. Coleman P., Mascarenhas R., Rumsby P. (2005). Science report «A Review of the Toxicity and Environmental Behaviour of Hydrogen Fluoride in Air». Bristol: Environment Agency, Rio House, Waterside Drive, Aztec West, Almondsbury. https://www.fluoridealert.org/wp-content/uploads/uk_hf_2006.pdf.
25. Басуров В.А., Зазнобина Н.И. *Химическая безопасность*. Учеб. пособие. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2016.
26. Методические указания к постановке исследований по изучению раздражающих свойств и обоснованию предельно допустимых концентраций избирательно действующих раздражающих веществ в воздухе рабочей зоны. Утв. зам. Главного государственного санитарного врача СССР 11 августа 1980 г. № 2196-80.
27. Лазарев Н.В., Гадаскина И.Д. (1977). *Вредные химические вещества*. Справочник. Л.: «Химия».
28. Gromov O.B. (2023). Separation of a gas mixture containing uranium hexafluoride, hydrogen fluoride, and chlorine trifluoride. *Atomic Energy*, 133(5–6), 301–306. <https://doi.org/10.1007/s10512-023-01012-4>.
29. ГОСТ 12.1.005-88 (2008). Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. М.: Стандартинформ.
30. Аншиц А.Г., Поляков П.В., Кучеренко А.В. и др. (1991). *Экологические аспекты производства алюминия электролизом*. Аналитический обзор. Новосибирск: Изд. ГПНТБ СО АН СССР.

References:

1. State report “On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2021 https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2021_/. (accessed 10.03.2024). (in Russ).
2. Frumin G.T. (2018). Toxicity of chemicals to humans. *Uchenye zapiski RGGMU*, (41), 188–198. (in Russ).
3. Gornostaeva E.A., Fuks S.L. (2017). The effect of fluorinated compounds on living organisms (Review). *Theoretical and Applied Ecology*, (1), 14–24. EDN: [ZHCB DV](#). (in Russ).
4. Gromov O.B., Prokudin V.K. (2008). Environmental hazards of gas emissions from aluminum production plants. *Ecology and Industry of Russia*, (10), 16–19. (in Russ).
5. Linge I.I., Novikov S.M., Shashina T.A. et al. (2007). Analysis of risks to public health from exposure to environmental factors of various natures in the area where the Siberian Chemical Plant is located. *Gigiena i sanitaria*, (5), 49–51. (in Russ).
6. Onoprienko M.G. (2004). Fluorine in the environment: edge of danger. *Ecology and Industry of Russia*, (5), 23–27. (in Russ).
7. Saltykova M.M., Balakaeva A.V., Fedichkina T.P. and Bobrovitsky I.P. (2020). Main causes of death due to air pollution. *Gigiena i sanitaria*, 99(4), 337–343. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-4-337-343>. (in Russ).
8. Vekovshina S.A., Klein S.V., Zhdanova-Zaplesvichko I.G. and Chetvyorkina K.V. (2018). The quality of the habitat and the health risk of the population living under the influence of emissions from non-ferrous metallurgy and woodworking industries *Gigiena i sanitaria*, 97(1), 16–20. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2018-97-1-16-20>. (in Russ).
9. Zaitseva N.V., May I.V. (2021). Main results, prospects for applying and improving health risk assessment for the population of Siberian cities - participants in the Clean Air project (Bratsk, Norilsk, Krasnoyarsk, Chita) *Gigiena i sanitaria*, 100(5), 519–527. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-5-519-527>. (in Russ).
10. SanPiN 2.1.3684-21. (in Russ).
11. Code of the Russian Federation on Administrative Offenses dated December 30, 2001 No. 195-

- FZ (as amended on December 12, 2023). (in Russ).
12. Smirnova V.M., Borisov A.V., Borisova G.N. and Ivashkin E.G. (2019). *Toxicology: industrial and environmental aspects*. Textbook allowance. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod. state tech. University named after R.E. Alekseeva. (in Russ).
 13. Zhukova A.G., Gorokhova L.G., Kiseleva A.V. Sazontova T.G., Mikhailova N.N. (2018). Experimental study of the effect of low concentrations of fluoride on the level of HSP family proteins in tissues. *Gigiena i sanitaria*, 97(7), 604–608. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2018-97-7-604-608>. (in Russ).
 14. Kalyuzhnaya E.E., Prosekov A.Yu. and Volobaev V.P. (2020). Genotoxic properties of fluoride ion. *Gigiena i sanitaria*, 99(3), 253–258. (in Russ).
 15. Rozhkov A.S., Mikhailova T.A. (1989). *The effect of fluorine-containing emissions on coniferous trees*. Novosibirsk: Nauka. (in Russ).
 16. Mirzakarimova M.A. (2017). Comparative hygienic assessment of the combined effect of complex mixtures of chemical air pollutants. *Gigiena i sanitaria*, 96(6), 528–531. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2017-96-6-528-531>. (in Russ).
 17. Gromov B.V. (1978). *Introduction to the chemical technology of uranium*. M.: Atomizdat. (in Russ).
 18. Nizkodubova S.V. (1999). *Development of OBUV (MPC) for phosphorus pentafluoride under working area conditions*. In the collection of reports of the 5th Scientific and Technical Committee of the Siberian Chemical Combine. Section 3. Seversk: NIKI SKhK, p. 328. (in Russ).
 19. Shevtsova N.M., Nizkodubova S.V., Kozlov Yu.A. et al (1999). *Iodine heptafluoride and its effect on peripheral blood in the experiment*. In the collection of reports of the 5th Scientific and Technical Committee of the Siberian Chemical Combine. Section 3. Seversk: NIKI SKhK, P. 328. (in Russ).
 20. Babenko S.P., Badin A.V. (2021). On a calculation method for assessing human exposure to the products of hydrolysis of uranium hexafluoride. *Gigiena i sanitaria*, 100(1), 13–18. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-1-13-18>. (in Russ).
 21. Safety Passport of JSC “PA ECP”. RPB No. 07623106.20.77128. (in Russ).
 22. Safety data sheet for the substance HF-RUS-60 “Hydrogen fluoride”. BKGroup LLC, 02.13.2021. (in Russ).
 23. Safety data sheet for the substance "Hydrogen fluoride". OOO SIAD Rus. BMP Index: 00070_LIQ. PBM Ref: 00070_LIQ. (in Russ).
 24. Coleman P., Mascarenhas R., Rumsby P. (2005). Science report «*A Review of the Toxicity and Environmental Behaviour of Hydrogen Fluoride in Air*». Bristol: Environment Agency, Rio House, Waterside Drive, Aztec West, Almondsbury. https://www.fluoridealert.org/wp-content/uploads/uk.hf_2006.pdf.
 25. Basurov V.A., Zaznobina N.I. *Chemical safety*. (2016). Textbook allowance. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University. (in Russ).
 26. Guidelines for conducting research to study irritant properties and justify the maximum permissible concentrations of selectively active irritants in the air of the work area. Approved deputy Chief State Sanitary Doctor of the USSR August 11, 1980 No. 2196-80. (in Russ).
 27. Lazarev N.V., Gadaskina I.D. (1977). *Harmful chemicals*. Reference textbook. L.: Khimiya. (in Russ).
 28. Gromov O.B. (2023). Separation of a gas mixture containing uranium hexafluoride, hydrogen fluoride, and chlorine trifluoride. *Atomic Energy*, 133(5–6), 301–306. <https://doi.org/10.1007/s10512-023-01012-4>.
 29. GOST 12.1.005-88 (2008). System of labour safety standards. General sanitary-hygienic requirements for the air of the working zone. Moscow: Standardinform. (in Russ).
 30. Anshits A.G., Polyakov P.V., Kucherenko A.V. et al. (1991). *Ecological aspects of aluminum production by electrolysis*. Analytical review. Novosibirsk: GPNTB SB AS USSR. (in Russ).